



TITLE:

Study on thermal mixing enhancement of liquid metal film-flow under magnetic fields by using submerged vortex generators( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Kusumi, Koji

---

CITATION:

Kusumi, Koji. Study on thermal mixing enhancement of liquid metal film-flow under magnetic fields by using submerged vortex generators. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-03-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21764>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2020-02-28に公開; 許諾条件により要約は2019-12-20に公開

|   |   |    |      |
|---|---|----|------|
| 京都大学  | 博士（工学）  | 氏名 | 楠見紘司 |
| 論文題目  | Study on thermal mixing enhancement of liquid metal film-flow under magnetic fields by using submerged vortex generators<br>(浸漬突起物による磁場下液体金属液膜流の温度混合促進に関する研究) |    |      |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、局所表面加熱された磁場下液体金属液膜流における新たな温度混合法として、液膜内に浸漬する突起物の設置を提案し、その特徴的な形状・配列について検討するため、実験および数値計算を実施した結果を詳細に検討し、磁場下液体金属液膜流における温度混合特性についてまとめるとともに、液体ダイバータに最適な冷却手法を提案しており、6章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、研究対象となる磁場閉じ込め型核融合炉を取り上げ、ダイバータ除熱が核融合炉成立の重要な課題である点を指摘している。様々なダイバータ冷却法を比較検討し、本研究で液体金属液膜流によるダイバータ冷却法を取り上げた理由を述べている。液体金属流ダイバータは、液体金属の高い熱輸送能力に加え、液膜流による対流熱伝達が期待できる点にあるが、強磁場による電磁流体力学(MHD)効果による流速低下と、それに伴う伝熱劣化による液膜流の表面温度上昇による蒸発量の増大が危惧されている。本研究では、突起物を液膜内に浸漬し、液膜流動を利用して受動的に発生する渦により温度混合を促進し、表面温度上昇の抑制を可能とする冷却法を提案しており、そのための研究手法について述べている。</p> <p>第2章は、数値計算の手法および結果について記述している。第3章で記述する実験結果と計算結果を比較するため、計算体系は実験で用いる試験流路と同寸法・同形状とし、流れはローレンツ力による流速抑制を考慮して層流状態を仮定している。実験は横磁場(液膜に平行で流路側壁に垂直な磁場)および垂直磁場(液膜に垂直で流路側壁に平行な磁場)の配位で行うため、数値計算も同様の磁場配位で実施し、突起物として四角柱・半球・デルタ翼を検討している。計算の結果、3種類の突起物の中では、磁場配位に関わらずデルタ翼が最も高い熱輸送効率を示すことを明らかにし、デルタ翼後流に発生する強い渦度、すなわち吸い込み渦がその原因であること、および磁場増加に伴い渦度の強度が減少し、その影響範囲も狭まることを見出している。さらに、横磁場の場合、突起物の設置にも関わらず熱輸送特性の低下を示し、それがMHD効果により渦軸が横磁場に沿うため、温度分布が成層化した原因であることを明らかにしている。また、千鳥配列と碁盤配列の突起物群についての計算の結果、垂直磁場の場合にはデルタ翼を千鳥配列にした場合に最も高い熱輸送効率を示すことを明らかにしている。これらの成果を、実験における突起物形状・配置条件の決定に反映している。</p> |   |    |      |

|  |        |    |      |
|--|--------|----|------|
| 京都大学   | 博士（工学） | 氏名 | 楠見紘司 |
| <p>第3章は、磁場下の液体金属液膜流実験の結果について記述している。実験はプリンストンプラズマ物理学研究所の様な横磁場配位の LMX 装置と、京大の垂直磁場配位（流路中央でピークを持つ放物形磁場分布）の LMFREX 装置を用い、局所表面加熱された液体金属液膜流の内部に単一および群配列した突起物を浸漬した場合について、様々な磁場強度に対する熱輸送特性を明らかにしている。まず、横磁場および垂直磁場条件で3種類の単一突起物による熱輸送特性を取得し、磁場配位に関わらずデルタ翼が高い壁面熱流束を示すことを明らかにしている。さらに、垂直磁場条件で液膜流表面温度を計測した結果、突起物（特にデルタ翼）を設置することで、液膜表面の温度上昇を緩和できることを見出している。一方、壁面温度分布から、垂直磁場では磁場強度の増加に伴い高温部が上流側の加熱源に近づくことが明らかとなり、加熱源直下の液膜流底面から効率的な除熱が可能であるという示唆に富む結果を得ている。しかし、横磁場条件で単一突起物を設置した場合、磁場強度の増加に伴い底面の高温域が下流側へ移動し、垂直磁場条件と逆の傾向が示された。この原因は第2章の数値計算で示唆された、横磁場による液深方向の流速分布に起因していると推測している。群配列実験では、工学的に設置が容易である半球を突起物として選定している。その結果、横磁場条件では半球群配列のピッチ幅に最適値が存在すること、および磁場増加に伴い底面の最大熱流束位置が上流側に移動することを明らかにし、単一突起物の場合とは逆の傾向を示すことを明らかにしている。さらに、垂直磁場実験では、デルタ翼の千鳥配列の場合に高い熱輸送効率を得られることを明らかにしている。また、実験と同条件で数値解析を行い、これらの実験結果を数値的に詳細に検討し、熱輸送効率と渦度分布との関連を考察している。</p> <p>第4章は、磁場下の液体金属液膜流の温度混合特性について、第2章および第3章で得られた成果に基づき、最適な突起物形状および配列について熱輸送効率の観点から総合的に評価・検討している。その結果、熱輸送が必要な領域にデルタ翼から発生する渦を作用させることにより、高い熱輸送が実現できるとの結論に至り、2種類の異なる高さのデルタ翼を千鳥配列で配列する方法が最適配置であると結論づけている。</p> <p>第5章は、実機への適用について、本研究の成果に基づいた新たなダイバータ冷却法の提案を行っている。具体的には、本提案の突起物周囲の壁面において局所的に熱流束が集中することから、この高熱流束領域を壁面裏側から衝突噴流で集中的に冷却する手法を提案している。</p> <p>第6章は総括結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p> |        |    |      |

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、局所表面加熱された磁場下液体金属液膜流内に突起物を浸漬する新たな温度混合法を提案し、磁場下の液体金属液膜流における温度混合特性について研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 数値解析および実験結果から、磁場の有無に関わらず、デルタ翼後流に発生する吸い込み渦が液膜表面から底面へ熱輸送を促進することを明らかにした。
2. 横磁場および垂直磁場条件で3種類の単一突起物による熱輸送特性を取得し、磁場配位に関わらずデルタ翼が高い壁面熱流束を示すことを明らかにした。
3. 垂直磁場条件で液膜流表面温度を計測した結果、単一デルタ翼を設置することで、液膜表面の温度上昇を緩和できることを見出した。
4. 壁面温度分布から、垂直磁場では磁場強度の増加に伴い高温部が上流側の加熱源に近づくことが明らかとなり、加熱源の直下流の液膜流底面から効率的な除熱が可能であるという示唆に富む結果を得た。
5. 単一突起物の場合、横磁場では磁場強度の増加に伴い底面の高温域が下流側へ移動し、垂直磁場では上流側へ移動する傾向が得られた。これは、MHD効果による液深方向流速分布の変化に起因することを数値解析から明らかにした。
6. 横磁場では半球群基盤配列のピッチ幅に最適値が存在すること、および磁場増加に伴い底面の最大熱流束位置が上流側に移動し、単一突起物の場合とは逆の傾向を示すことを明らかにした。
7. 垂直磁場ではデルタ翼群千鳥配列が高熱輸送効率を示すことを明らかにした。
8. 最適な突起物形状および配列について熱輸送効率の観点から総合的に評価・検討した結果、異なる高さのデルタ翼を千鳥配列で交互に配列する方法が最適配置であると結論付けた。
9. 垂直磁場では突起物周囲の液膜底面に局所的に熱流束が集中することから、この高熱流束領域を流路底面の裏面から衝突噴流で冷却する手法を提案した。

本論文は、核融合炉ダイバータを液体金属液膜流で効率的に冷却する新たな方法を提案し、その温度混合特性に関する研究成果をまとめたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年2月26日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、(平成32年2月27日までの間)当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。